

$$B = \frac{\sum_n P(n\Delta t) P_0(n\Delta t)}{\sum_n P_0^2(n\Delta t)}, \quad D = \frac{\sum_n P^2(n\Delta t)}{\sum_n P_0^2(n\Delta t)}.$$

Эти функционалы определяют меру схожести не зашумлённого сигнала, имеющего мощность  $P_0(t)$ , и восстановленного из шума сигнала, имеющего мощность  $P(t)$ . Чем ближе данные функционалы к единице, тем выше вероятность того, что принятый сигнал является фрактальным импульсом, который соответствует логической единице.

В ходе численных экспериментов было показано, что при наличии в световоде повышенной дисперсии, функционалы схожести могут принимать значения, меньшие, чем 0,5. Это может привести к тому, что при передаче логической единицы, очищенная от шума реализация будет воспринята как сигнал, соответствующий логическому нулю. Поэтому при повышенном значении дисперсии в линии передачи, необходимо соответствующим образом скорректировать выражения для величин  $B$  и  $D$ . Для этого мы должны за функцию  $P_0(t)$  принимать квадрат амплитуды диспергировавшего импульса. Было показано, что в случае указанной корректировки функционалы схожести  $B$  и  $D$  принимают значения, близкие к единице. Естественно, что такую коррекцию могут произвести только сами получатели секретной информации, так как только им известны параметры ВС. Напротив, злоумышленнику без дополнительной информации о коэффициенте дисперсии не удастся организовать эффективное считывание данных.

#### Литература

- 1 Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. - М.: Техносфера, 2004. – 416с.
- 2 Сухарев, Е.М. Информационная безопасность: методы шифрования / Е.М. Сухарев, Кн.7. – М.: Радиотехника, 2011. – 208с.
- 3 Болотов, В.Н. Генерирование сигналов с фрактальными спектрами / В.Н. Болотов, Ю.В. Ткач // Журнал технической физики. – 2006. – Т.76. - вып.4, с.91 – 98.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРА УСИЛЕНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*О.Г. Морозов<sup>1</sup>, Г.А. Морозов<sup>2</sup>, А.А. Талипов<sup>3</sup>, В.Г. Куприянов<sup>4</sup>*

<sup>1,2,3</sup> Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н. Туполева, microoil@mail.ru; nicpre@nm.ru; talipov.anvar@gmail.com;

<sup>4</sup> Москва, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения)

### CHARACTERIZATION OF STIMULATED MANDELSTAM-BRILLOUIN SCATTERING SPECTRUM USING A DOUBLE-FREQUENCY PROBING RADIATION

*O.G. Morozov, G.A. Morozov, A.A. Talipov, V.G. Kupriyanov*

В работе представлен новый метод определения характеристик спектра усиления, вызванного эффектом вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), в одномодовом оптическом волокне. Метод основан на использовании двухчастотного зондирующего излучения. Для преобразования комплексного спектра ВРМБ из оптической области в электрическую применяется однополосная модуляция. Нахождение характеризующего положения составляющих двухчастотного излучения в контуре усиления осуществляется через ко-

эффект амплитудной модуляции их огибающей и разность фаз между огибающими зондирующих и прошедших через контур составляющих.

Оптический сигнал от лазерного диода с длиной волны 1550 нм с шириной полосы около 100 кГц разделяется по двум каналам устройством оптической развязки. В первом канале сигнал модулируется в оптическом однополосном модуляторе, на один из входов которого подан сигнал от частотного объединителя. Оптический однополосный модулятор выполнен на основе двухканального модулятора Маха-Цендера. Далее модулированный сигнал подается на тестируемый участок волокна (ТУВ), в котором встречно распространяется оптическое излучение, прошедшее по второму каналу. Немодулированное излучение является излучением накачки ВРМБ в ТУВ. Однополосное двухчастотное излучение с составляющими  $f_1 = f_{rf} - \Delta f$  и  $f_2 = f_{rf} + \Delta f$  зондирует спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна (СУМБ), при этом частота  $\nu_0 - f_{rf}$  при настройке на центр контура усиления соответствует его центральной частоте  $\nu_{MB}$ , расстройка  $\Delta f$  – половине его полуширины  $\Delta\nu_{MB}$ , а частота несущей  $\nu_0$  – частоте накачки  $\nu_P = c/\lambda_P$ . На рис.1 представлены экспериментальная установка для проведения измерений (а) и процесс зондирования (б).

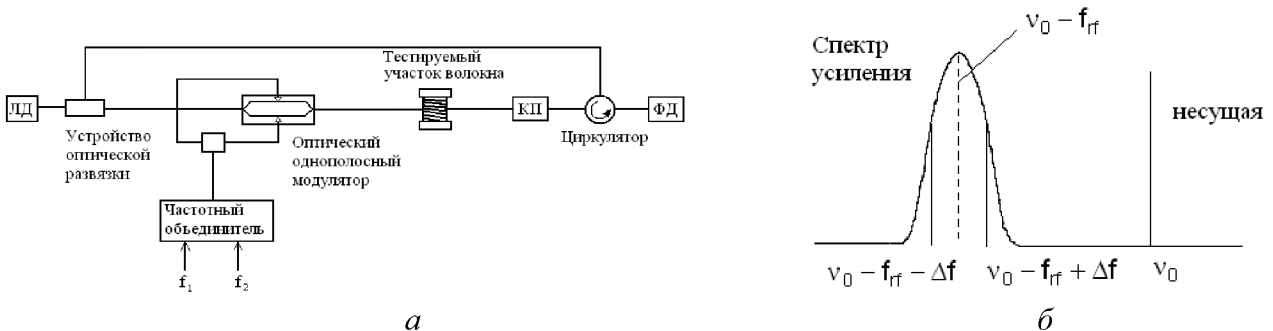


Рис. 1 - Экспериментальная установка (а), ЛД – лазерный диод; КП – контроллер поляризации; ФД – фотодетектор; зондирование спектра усиления двухчастотным сигналом (б)

Излучение на выходе оптического однополосного модулятора определяется выражением:

$$E_{in}(t) = A_0 \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t] \quad (1)$$

где  $A_0 = |A_0| \exp(j\varphi_0)$ ,  $A_{-1} = |A_{-1}| \exp(j\varphi_{-1})$ ,  $A_{-2} = |A_{-2}| \exp(j\varphi_{-2})$  – комплексные амплитуды оптической несущей и двухчастотного сигнала. Этот оптический сигнал распространяется через ТУВ, который имеет передаточную функцию, характеризующую спектр усиления  $H(\nu)$ ; следовательно, оптическая область на выходе волокна будет определяться выражением

$$E_{out}(t) = A_0 |H(\nu_0)| \exp[j \arg H(\nu_0)] \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)] \times \exp[j 2\pi(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)] \times \exp[j 2\pi(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t]. \quad (2)$$

Выходной ток на частоте биений между двумя зондирующими составляющими  $2\Delta f$  пропорционален

$$|i_{out}(t)| \propto |A_{-1}| |A_{-2}| |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \times \cos[4\pi\Delta f t + \varphi_{-1} - \varphi_{-2} + \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f) - \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)]. \quad (3)$$

Из электрического выходного сигнала детектора можно получить образ оптической передаточной функции на частотах двух зондирующих сигналов. Анализ по огибающей  $2\Delta f$  позволил построить измерительные характеристики для определения центральной час-

тоты контура усиления по ее амплитуде (рис. 2, а), а также разности фаз или знаку разности фаз (рис. 2, б) между огибающими на входе и выходе ТУВ, аналогично [1].

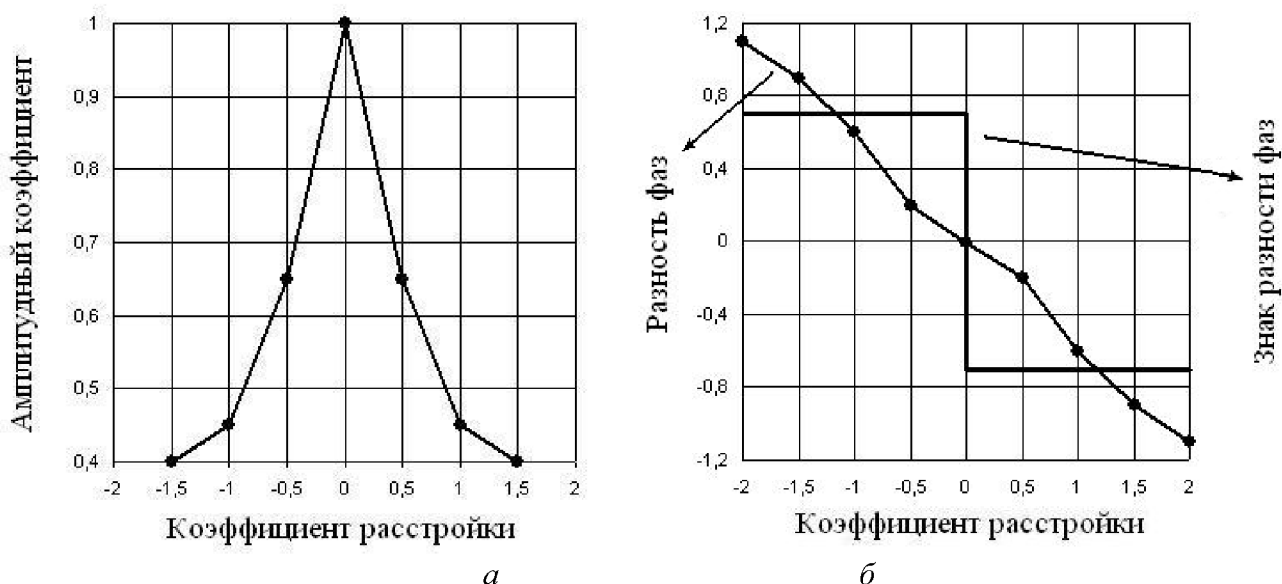


Рис. 2 - Амплитуда (а), разность фаз и знак разности фаз (б) огибающих на входе и выходе ТУВ как функция расстройки от центральной частоты СУМБ

Характерно, что в момент достижения средней частоты двухчастотного сигнала  $\nu_0 - f_{\text{г}}$  резонансной частоты контура усиления  $\nu_B$ , огибающая выходного сигнала по фазе совпадает с огибающей двухчастотного сигнала на входе ТУВ (рис. 2,б), а коэффициент модуляции огибающей выходного двухчастотного сигнала максимален и равен 1 (рис. 2,а). При этом относительная погрешность измерения центральной частоты может составить 0,1% и определяется шириной линии лазерного излучения (в нашем случае 0,1 МГц), а также точностью поддержания разностной частоты  $2\Delta f$ . Определенную долю погрешности может вносить наличие в спектре не полностью подавленной верхней боковой полосы двухчастотного излучения. Среди методов ее уменьшения может быть рассмотрено применение chirpированной волоконной решетки Брэгга, настроенной на ее подавление в полосе возможного изменения положения при сканировании. Такое решение представляется нам более эффективным, чем предложенное в [2], как по эффективности подавления, так и по возможности контроля искажений, вызванных хроматической дисперсией.

### Литература

1. Морозов О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, О.А. Степушенко, И.Р. Садыков // Вестник МарГТУ. – 2010. No. 3 – С. 3-13.
2. Loayssa, A. Swept optical single sideband modulation for spectral measurement applications using stimulated Brillouin scattering / M. Sagues and A. Loayssa // Optics Express. – 2010. Vol. 18, No. 16. – P. 17555-17568.